明槽急变流: 理论和在水工中的应用

余常昭　编著

清华大学出版社

(京)新登字 158 号

内 容 简 介

本书对明槽急变流提出一个较系统的体系,阐明其理论和分析方法以及在水工中的应用。全书分为 8 章: 第 1 章总论, 较全面地回顾了明槽流的性质、基本方程和主要内涵, 两种流态特征, 提出急变流的分类与求解途径。第 2 章至第 5 章, 按缓流、急流及流态过渡分别论述各类明槽急变流的特征及典型问题的分析计算方法。第 6 章以水工建筑物泄流的消能段急变流作为综合应用的典型问题进行分析。第 7 章动床急变流, 着重讨论局部冲刷问题。第 8 章非定常急变流, 介绍渠道断波, 溃坝波及潮流中排放的近区流动等几个典型问题。

本书可作为水利水电工程及其他与明槽流有关专业的大学本科生和研究生的教学参考书。也可供与这些专业有关的工程设计和科研技术人员作为参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

明槽急变流: 理论和在水工中的应用/余常昭编著.
北京: 清华大学出版社, 1999
ISBN 7-302-03570-9

Ⅰ.明… Ⅱ.余… Ⅲ.明渠流动-急流 Ⅳ.TV133

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (1999) 第 14418 号

出版者: 清华大学出版社 (北京清华大学校内, 邮编 100084)
http://www.tup.tsinghua.edu.cn
印刷者: 人民文学印刷厂
发行者: 新华书店总店北京发行所
开 本: 850×1168 1/32 印张: 10.625 字数: 272 千字
版 次: 1999 年 11 月第 1 版 1999 年 11 月第 1 次印刷
书 号: ISBN 7-302-03570-9/TV·31
印 数: 0001～2000
定 价: 28.00 元

RAPIDLY VARIED OPEN-CHANNEL FLOW
Theory and applications in hydraulic engineering by Yu Chang-zhao

ABSTRACT

In this book a more systematic statement of the theory and applications in hydraulic engineering for rapidly varied open-channel flow is proposed. It consists of eight chapters. Chapter I is a comprehensive statement for open-channel flow which includes basic equations, chacracteristics of flow regime as well as the types and approaches for investigation of the rapidly varied flows. Chapters II - V deal with the typical problems of various types of rapidly varied flow classified as subcritical, supercritical, transition from subcritical to supercritical and vice-versa (i. e the hydraulic jumps) respectively. Chapter VI describes a typical composite application i.e rapidly varied flows in the dissipation reach downstream of hydraulic structures. Chapter VII rapidly varied flow on erodible beds describes chiefly problems of local scour. Chapter VIII unsteady rapidly varied flows is concerned with the problem of surges, dam-break wave, and near-field flow for efflux in tidal river.

This book can be used as main reference for under-graduate or graduate students of hydraulic engineering or related specialities. It can also be helpful for hydraulic designer and reseachers as an useful reference in practice.

前　言

明槽流动是水利水电工程和其他工程，如给水排水、环境、航运等有关专业的主要基础理论。明槽流的教材和专著以往在国内外虽已出版不少，但其内容多以论述比较成熟的渐变流为主，对于现象较复杂的急变流系统的论述很少。我国建设事业的发展，特别是在水工建筑物的水力设计方面对明槽急变流理论和分析计算方法的要求甚为重要，考虑到近年国内外在这方面的研究有不少发展和提高，目前已有可能对明槽急变流作较为系统的论述，这就促使作者进行编写本书的工作。

本书内涵有下面几个特点：

1．将明槽急变流按缓流、急流及流态过渡不同情况分类，按其特征作系统的论述，并引入近年在理论和应用上的新发展。

2．在一般定床情况之外，增加动床急变流部分，内容主要针对泄水建筑物下游的局部冲刷问题，包含作者、作者指导的研究生和作者所在科研组多年的工作和国内的若干新成果。

3．对急变流的分析计算，分为综体流态和内部结构两方面，综体按传统的总流方法，内部结构则介绍近年采用二阶湍流模型数值计算取得的一些代表性的进展，以及应用现代量测技术对流动机理取得的若干成果。

全书共分 8 章，第 1 章总论概述明槽流的基本方程，流态特征与判别准则，急变流的分类和问题的求解途径。第 2 章至第 5 章分别按明槽急变流的缓流、急流及流态过渡区论述各种类型的特征及典型问题的分析计算方法。第 6 章以水工建筑物泄流衔接消能段急变流作为各类急变流综合应用的典型，介绍其分析求解方

法。第 7 章动床急变流着重讨论局部冲刷问题。第 8 章非定常急变流重点介绍几个典型问题：渠道断波、溃坝波及潮汐流中排放近区的流动等。

本书是一本专门问题的论著，可作为上述有关专业的大学本科生或研究生的教学参考书和工程技术人员及科研人员的参考书。作者至盼得到各方面读者对本书内容的指正意见。

本书出版得到清华大学学术专著出版基金资助，谨此表示衷心感谢。

作者

1998 年 4 月

XVII XVIII XVII XVIII

目　　录

第 1 章　总论 …… (1)

1-1　概述 …… (1)

1-2　明槽流的基本方程 …… (2)

一、明槽流的基本微分方程组 …… (2)

二、明槽总流的积分方程 …… (5)

1-3　明槽流的两种流态：缓流和急流 …… (9)

一、微波波速，临界流速 …… (9)

二、比能，临界水深 …… (12)

三、弗劳德数、流态判别准则小结 …… (16)

1-4　明槽均匀流和定常渐变流简述 …… (17)

一、明槽均匀流 …… (17)

二、明槽中定常渐变流 …… (21)

1-5　明槽中急变流的特征和类型 …… (27)

1-6　明槽急变流问题的求解途径 …… (30)

一、应用一维总流理论结合必要的实验 …… (31)

二、将基本微分方程简化求近似解 …… (31)

三、用湍流模型封闭雷诺方程进行数值计算 …… (31)

四、实验方法 …… (31)

1-7　湍流模型简述 …… (33)

一、常系数涡粘性模型 …… (33)

二、混合长度模型 …… (34)

三、k-ε二方程模型 …… (35)

四、雷诺应力传输方程模型 …… (39)

参考文献 …… (41)
第 2 章　缓流向急流过渡的急变流 …… (42)
2-1　水跌现象的工程类型及流动特征 …… (42)
2-2　急变流的比能和临界水深 …… (43)
2-3　宽顶堰溢流，堰流的公式和系数 …… (45)
2-4　薄壁堰溢流 …… (50)
2-5　实用剖面堰溢流 …… (56)
一、实用高堰的剖面形状和流量系数 …… (57)
二、实用低堰的特点与流量系数 …… (63)
三、实用剖面堰流的侧边收缩 …… (64)
2-6　堰顶溢流的淹没问题与淹没系数 …… (65)
2-7　自由面重力势流理论在坝顶自由溢流
分析的应用 …… (69)
参考文献 …… (71)
第 3 章　急流向缓流过渡的急变流 …… (72)
3-1　水跃现象与类型分析研究的方法 …… (72)
3-2　平底槽中二维自由完整水跃的综合特性 …… (76)
3-3　平底槽二维水跃的内部流动结构特性 …… (81)
一、水跃的时均流动特性 …… (81)
二、水跃的紊动特性 …… (86)
3-4　平底棱柱形明槽中的水跃方程 …… (92)
3-5　平底矩形断面扩散槽中的水跃 …… (97)
3-6　斜坡上矩形断面槽中的水跃 …… (98)
3-7　关于跃前水流掺气的水跃问题 …… (100)
3-8　分层流中的内水跃 …… (101)
参考文献 …… (104)
第 4 章　缓流区内的急变流 …… (106)
4-1　弯道缓流特性的传统分析 …… (106)

一、弯道缓流的横向水面坡度与超高 …… (107)
二、弯道缓流的断面环流 …… (109)
三、缓流弯段上的水头损失 …… (111)
4-2 深度平均的湍流模型 …… (113)
一、深度平均的简化标准 k-ε湍流模型 …… (113)
二、完全深度平均的湍流模型 …… (117)
4-3 应用湍流模型计算弯道缓流的成果 …… (128)
4-4 侧边排入明槽中近区流动的湍流模型计算成果 … (130)
参考文献…… (135)
第 5 章 急流区内的急变流…… (136)
5-1 急流激波的基本性质 …… (136)
5-2 急流弯道水流 …… (143)
5-3 直槽变断面过渡段的急流 …… (148)
一、槽身断面缩窄的过渡段急流 …… (148)
二、槽身断面扩宽段的急流 …… (150)
5-4 急流的特征线解法 …… (153)
一、平面二维流动的基本方程组 …… (154)
二、普遍情况下的特征线方程及特征关系式 … (155)
三、平底、忽略摩阻力时的方程与图解法 …… (157)
5-5 急流特性在挑流消能窄缝槽的应用 …… (162)
参考文献…… (169)
第 6 章 水工建筑物泄流衔接消能段的急变流…… (170)
6-1 概述 …… (170)
6-2 底流型的衔接消能段水流 …… (175)
一、底流水跃衔接的三种可能形式 …… (175)
二、形成消能池的几种基本措施及其
水力计算 …… (176)
三、多级跌水消能池 …… (181)

四、消能池的辅助消能工 …… (185)
五、消能池水跃后的水流与河床加固 …… (187)
6-3 面流型和混合流型的衔接消能段水流 …… (189)
一、水平或小挑角跌坎射流的衔接方式 …… (189)
二、消能戽的水流衔接消能方式 …… (195)
三、面流型衔接段水流的流场结构特性 …… (197)
6-4 挑流型的衔接消能段水流 …… (205)
一、流动的综体形态与挑流射程的计算 …… (205)
二、挑射水股在空中的运动特性 …… (209)
三、挑射水股落入下游水垫后的特性 …… (214)
四、挑射水股对下游槽底的冲击压强 …… (216)
五、几种新型的挑流消能措施与设计思想的讨论 …… (220)
6-5 关于衔接消能段水流的补充讨论 …… (226)
一、几种基本消能方式的联合应用 …… (226)
二、衔接消能段水流的内部机理和有关问题 … (227)
三、有关实验手段和计算方法 …… (227)
参考文献 …… (228)
第 7 章 动床急变流与局部冲刷 …… (230)
7-1 概述 …… (230)
一、急变水流的冲刷作用与河床的抗冲能力 … (230)
二、河床的三种类型与三种典型局部水流的冲刷 …… (231)
三、关于急变流局部冲刷问题研究的途径 …… (232)
7-2 急变流中床料的受力状况与起动分析 …… (233)
一、河床表面粒料的受力状况 …… (233)
二、河床粒料的起动分析 …… (235)
7-3 冲击流型的局部冲刷 …… (236)

一、无粘性散粒体床料的冲刷 …… (238)
二、岩石河床的冲刷 …… (245)
三、挑流冲刷各种类型估算公式的介绍 …… (251)
7-4 回流型的局部冲刷 …… (256)
一、面流衔接的局部冲刷 …… (256)
二、底流衔接消能的局部冲刷 …… (258)
三、戽流衔接消能的局部冲刷 …… (260)
7-5 绕流型的局部冲刷 …… (264)
一、桥墩冲刷的现象与绕流型局部冲刷的特征 …… (264)
二、桥墩局部冲刷深度的估算公式 …… (266)
7-6 局部冲刷的实验模拟 …… (279)
一、散粒体河床的模拟 …… (280)
二、岩石河床的模拟 …… (281)
三、关于粘性土质河床的模拟 …… (289)
参考文献 …… (289)
第 8 章 明槽中的非定常急变流 …… (293)
8-1 概述 …… (293)
8-2 棱柱形明槽中断波的波速与波流量 …… (295)
8-3 溃坝波 …… (299)
一、溃坝最大流量的估算 …… (299)
二、溃坝的坝址流量过程线 …… (305)
8-4 潮汐流中排放的近区流动 …… (308)
一、排放近区流动的若干特性 …… (308)
二、应用湍流模型计算近区流动 …… (311)
三、关于“准定常”近似计算 …… (315)
参考文献 …… (317)

CONTENTS

Chapter I Comprehensive Statement for Open-channel Flow ····· (1)

1.1 General description ····· (1)

1.2 Basic equations of open-channel flow ····· (2)

1. Basic differential equations of open-channel flow ····· (2)

2. Integral equations of the averaged open-channel flow ····· (5)

1.3 Regimes of open-channel flow: subcritical and supercritical ····· (9)

1. Celerity ····· (9)

2. Specific energy, critical depth ····· (12)

3. Froude number, criterion for flow regime ····· (16)

1.4 Brief introduction for uniform flow and steady gradually varied flow ····· (17)

1. Uniform flow ····· (17)

2. Steady gradually varied flow ····· (21)

1.5 Types and Characteristics of rapidly varied open-channel flow ····· (27)

1.6 Approaches for solving problems of rapidly varied open-channel flow ····· (30)

1. One dimensional theory with proper

experiment ····· (31)
2. Approximate solution of basic differential equations ····· (31)
3. Numerical simulation of Reynolds equation using the turbulence models ····· (31)
4. Experimental methods ····· (31)
1.7 Brief introduction for turbulence models ····· (33)
1. Constant eddy viscosity coefficient model ····· (33)
2. Mixing length model ····· (34)
3. k-εtwo equation model ····· (35)
4. Reynolds stress equation model ····· (39)
References ····· (41)

Chapter II Rapidly Varied Flow Transition from Subcritical to Supercritical ····· (42)

2.1 The hydraudlic drop: phenomena, types and flow characteristics ····· (42)
2.2 Specific energy and critical depth for rapidly varied flow ····· (43)
2.3 Broad-crested weir ····· (45)
2.4 Sharp-crested weir ····· (50)
2.5 Practical profile weir ····· (56)
1. Crest shape and coefficient of discharge for high practical profile weir ····· (57)
2. Properties and coefficient of discharge for low practical profile weir ····· (63)
3. Lateral contraction for practical profile

weir ····· (64)
2.6 Submergence of weir ····· (65)
2.7 Weir flow analysis using the theory of free surface potential flow ····· (69)
References ····· (71)

Chapter III Rapidly Varied Flow Transition from Supercritical to Subcritical ····· (72)

3.1 The hydraulic jump: types, phenomena and approaches for analysis ····· (72)
3.2 Overall properties of two-dimensional free complete hydraulic jump in horizontal channel ····· (76)
3.3 Internal flow structural characteristics of two-dimensional hydraulic jump in horizontal channel ····· (81)
1. Mean flow characteristics of the jump ····· (81)
2. Fluctuation characteristics of the jump ····· (86)
3.4 Equation of hydraulic jump in horizontal prismatic channel ····· (92)
3.5 Hydraulic jump in horizontal rectangular diverging channel ····· (97)
3.6 Hydraulic jump in sloping channel ····· (98)
3.7 On the flow aeration pre-hydraulic jump ····· (100)
3.8 Internal hydraulic jumps in stratified flow ··· (101)
References ····· (104)

Chapter IV Rapidly Varied Flows in Subcritical Region ····· (106)

4.1 Conventional analysis for properties of subcritical flow in curved channel ····· (106)
1. Transverse surface slope and superelevation ····· (107)
2. Secondary flow in cross-sectional plane ··· (109)
3. Head loss in the bend ····· (111)
4.2 Depth averaged turbulence model ····· (113)
1. The simplified depth averaged k-ε turbulence model ····· (113)
2. The complete depth averaged turbulence model ····· (117)
4.3 Computational results of subcrictical flow in bend using turbulence model ····· (128)
4.4 Computational results of near-field flow for lateral efflux using turbulence model ····· (130)
References ····· (135)

Chapter V Rapidly Varied Flow in Supercritical Region ····· (136)

5.1 Basic properties of shock wave in supercritical flow ····· (136)
5.2 Supercritical flow in curved channel ····· (143)
5.3 Supercritical flow through transition of variable crosssection ····· (148)
1. Supercritical flow through contractions ··· (148)
2. Supercritical flow through expandsions ··· (150)
5.4 Method of characteristics for supercritical flow analysis ····· (153)

1. Basic equations of two-dimentional plam flow ····· (154)
2. Equations of characteristics for general case ····· (155)
3. Equations of characteristics for zero friction on horizontal bottom and the solution by graphical method ····· (157)
5.5 Application of supercritical flow properties in the contracted narrow passage bucket type energy dissipator design ····· (162)
References ····· (169)
Chapter VI Rapidly Varied Flow in the Energy Dissipation-Reach Downstream of Hydraulic Structures ····· (170)
6.1 Introduction ····· (170)
6.2 Flows in bottom-type energy dissipation reach ····· (175)
1. Three possible forms of hydraulic jump for bottom-type dissipation ····· (175)
2. Several basic classes of stilling basins and their hydraulic design procedure ····· (176)
3. Stilling basins for multiple hydraulic drops ····· (181)
4. Supplementary dissipators in stilling basin ····· (185)
5. Flow behind the hydraulic jump basin and river bed protection ····· (187)
6.3 Flows in surface-type and in mixed-type

energy dissipation reaches …… (189)
1. Flow efflex from horizontal or small angle bucket …… (189)
2. Flow with roller bucket …… (195)
3. Structural characteristics of flow field for surface-type dissipation reach …… (197)
6.4 Flows in sky-jump type energy dissipation … (205)
1. Overall flow configuration and distance of the jet trajectory …… (205)
2. Properties of the water jet in air …… (209)
3. Properties of the water jet in tail-water cushion …… (214)
4. Impulse pressure on channel bed downstream by the water jet …… (216)
5. Several new sky-jump type dissipators … (220)
6.5 Supplemental discussions on flows in energy dissipation reach …… (226)
1. Combined applications of basic types of energy dissipation device …… (226)
2. On the internal mechanism on flows in energy dissipation reach …… (227)
3. Experimental devices and computational methods …… (227)
References …… (228)
Chapter Ⅶ Rapidly Varied Flow on Erodible Beds and Problems of Local Scour …… (230)
7.1 Introduction …… (230)

1. The scour action of rapidly varied flow and the anti-scour capacity of channel bed …… (230)
2. Three types of river bed and scours of three typical local flows …… (231)
3. Approaches for investigation of local scour by rapidly varied flow …… (232)
7.2 Acting forces on bed grains and move-off condition for which in rapidly varied flow …… (233)
1. Forces acting on bed grainds …… (233)
2. Analysis of the move-off condition for bed grainds …… (235)
7.3 Local scour by impulse type flow …… (236)
1. Scour for loose bed materials …… (238)
2. Scour for rocky beds …… (245)
3. Formulas for estimating local scour by sky-jump water jets …… (251)
7.4 Local scour by circulation type flow …… (256)
1. Local scour for flow of surface-type dissipation …… (256)
2. Local scour for flow of bottom-type dissipation …… (258)
3. Local scour for flow with roller bucket … (260)
7.5 Local scour by flow around solid body …… (264)
1. Scour for piers of bridge: phenomenon and characteristics of scour …… (264)
2. Formulas for estimating the depth of local scour for bridge pier …… (266)
7.6 Physical experiment simulation of local